

# VU Research Portal

## A Quantum Degenerate Mixture of Metastable Helium-3 and Helium-4 Atoms

McNamara, J.M.

2009

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

McNamara, J. M. (2009). *A Quantum Degenerate Mixture of Metastable Helium-3 and Helium-4 Atoms*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

# Samenvatting

Gedurende de laatste eeuw heeft de atoom-, molecuul- en optische (AMO) fysica zich sterk gericht op een steeds betere controle over atomaire en moleculaire systemen. AMO fysici hebben daarbij geleerd hoe ze zowel de interne als de externe vrijheidsgraden van deze systemen kunnen manipuleren door toepassing van externe velden. Dit kan nu zo goed gedaan worden dat we in staat zijn experimenten te ontwerpen die een atomaire configuratie realiseren waarvan de eigenschappen kunnen worden gestuurd en gecontroleerd. In deze experimenten kunnen we bijna ideale systemen exploiteren, i.e. systemen die vrij zijn van ongewenste invloeden van buitenaf en waarvan we alle relevante parameters kunnen instellen. Zo kunnen experimenten uitgevoerd worden met ongeken- de nauwkeurigheid en kunnen nieuwe fysische fenomenen worden ontdekt. Het belang van deze mogelijkheden was al snel duidelijk en veroorzaakte een revolutie in de AMO fysica. Deze revolutie is nu nog steeds aan de gang en heeft impact niet alleen in andere delen van de natuurkunde, maar ook in de scheikunde en biologie, en de commerciële sector.

Dit proefschrift beschrijft experimenten aan helium in de metastabiele  $2^3S_1$  toestand ( $\text{He}^*$ ), uitgevoerd in het Laser centrum van de Vrije Universiteit in Amsterdam tussen November 2002 en November 2006. Helium heeft twee stabiele isotopen,  $^3\text{He}$  (een fermion) en  $^4\text{He}$  (een boson), met verschillende quantumstatistiek. Doel van het onderzoek was een mengsel van beide isotopen te maken in het quantum ontaarde regime, dat dan als platform gebruikt kan worden voor verdere studies aan deze quantummechanische systemen. Het onderzoek is uitgevoerd in twee vergelijkbare opstellingen, en het proefschrift is daarom onderverdeeld in twee delen. Deel I is gewijd aan het magneto-optisch opslui-

ten van  $^3\text{He}^*$  en  $^4\text{He}^*$ , terwijl deel II zich richt op de realisatie en studie van ultrakoude  $^3\text{He}^*$  en  $^4\text{He}^*$  gassen, en mengsels daarvan.

Als introductie geeft Hoofdstuk 1 de motivatie voor het onderzoek dat in de latere hoofdstukken wordt besproken. Dit hoofdstuk plaatst het werk in een breder perspectief ten aanzien van zowel de geschiedenis van koude en ultrakoude gassen als van gerelateerd werk aan metastabiel helium.

Hoofdstuk 2 beschrijft de opstelling die gebruikt is voor de experimenten uit deel I van dit proefschrift. Helium in de grondtoestand stroomt uit een reservoir door een met vloeibaar stikstof ( $\text{LN}_2$ ) gekoelde ontlading waar botsingen met electronen een kleine (doch voldoende grote) fractie van de atomen in de langlevende metastabiele  $2^3\text{S}_1$  toestand brengt. Een bundel  $\text{He}^*$  atomen stroomt uit de ontlading en wordt, om de helderheid te verhogen, gecollimeerd met de gekromde golffronten techniek, voordat een Zeeman afremmer de atomen afremt tot een gemiddelde snelheid van ongeveer 50 m/s. Deze intense bundel langzame  $\text{He}^*$  atomen wordt gebruikt om een magneto-optische val (MOT) te laden, die op zijn beurt de atomen opsluit en verder koelt tot een temperatuur van ongeveer 1 mK. Twee lasers (één voor elk isotoop) leveren het licht voor alle benodigde frequenties ten behoeve van collimatie, afremmen en magneto-optisch opsluiten van de atomen. Als de atomen eenmaal opgesloten zijn kunnen ze bestudeerd worden met één (of meerdere) diagnostische technieken: afbeelden van de fluorescentie dan wel absorptie van een probe bundel, vluchttijd (time-of-flight, TOF) analyse, of door het detecteren van ionen, geproduceerd tijdens ioniserende botsingen van koude atomen.

Het gelijktijdig opsluiten van zowel  $^3\text{He}^*$  als  $^4\text{He}^*$  in een MOT is voor het eerst gedemonstreerd in het werk beschreven in Hoofdstuk 3. De opgesloten wolken atomen, met daarin tot  $1.5 \times 10^8$  atomen van elk isotoop, zijn gekarakteriseerd door het detecteren van metastabielen en ionen die aan de val ontsnappen. Optisch pompen van  $^3\text{He}$  atomen naar een hyperfijn-toestand waarin de atomen niet kunnen worden opgesloten, is onderzocht en het bleek dat grote aantallen atomen kunnen worden opgesloten zonder extra laserlicht voor terugpompen naar de juiste hyperfijn-toestand. Eerder zijn vergelijkbare aantallen  $^4\text{He}^*$  atomen in een MOT opgesloten, maar de resultaten voor  $^3\text{He}^*$  zijn drie ordes van grootte beter dan in eerdere studies. De resultaten van dit onderzoek bleken een ideaal startpunt voor experimenten die tot doel hadden quantum ontaarde mengsels van spin-gepolariseerde  $^3\text{He}^*$  en  $^4\text{He}^*$  te realiseren.

Een theoretische studie van ioniserende botsingen tussen twee atomen in een verdund, laser-gekoeld en opgesloten mengsel van  $^3\text{He}^*$  en  $^4\text{He}^*$  atomen wordt beschreven in Hoofdstuk 4. Startend met de relevante moleculaire potentialen wordt een eenvoudig, één-kanaals model afgeleid dat binaire ioniserende botsingen tussen  $\text{He}^*$  atomen beschrijft. Dit model wordt gebruikt om de reactiesnelheid voor ioniserende botsingsprocessen in onze twee-isotopen MOT

(TIMOT) te berekenen. Het blijkt dat verschillende reactiesnelheden verwacht worden voor verschillende isotopencombinaties, en dat deze verschillen toegeschreven kunnen worden aan het verschil in quantumstatistiek voor beide heliumisotopen (in combinatie met de aanwezigheid van een kernspin in het geval van  $^3\text{He}$ ).

De experimentele bepaling van bovengenoemde reactiesnelheden wordt gepresenteerd in Hoofdstuk 5. Ionisatiesnelheden worden bepaald uit metingen van verliezen in de MOT als gevolg van botsingen in aanwezigheid van resonant licht in combinatie met vergelijkende metingen van de productiesnelheid van ionen in aanwezigheid en afwezigheid van MOT-licht. De resultaten zijn gecorrigeerd voor polarisatie-effecten in de MOT en komen zeer goed overeen met de berekeningen uit Hoofdstuk 4. Deze resultaten representeren daarom een goed begrip van de belangrijkste verliesprocessen in ongepolariseerde mengsels van verschillende isotopen van  $\text{He}^*$  en, daarom, een goed begrip van fysische processen die plaatsvinden in (TI)MOTs van  $\text{He}^*$ .

Hoofdstuk 6 beschrijft de experimentele opstelling voor het produceren van een Bose-Einstein condensaat (BEC) van  $^4\text{He}^*$ . Verschillen tussen deze opstelling en die uit deel I van dit proefschrift worden benadrukt, en het productieproces van het condensaat wordt uiteengezet. Tenslotte wordt het BEC zelf beschreven. Een BEC met meer dan  $1.5 \times 10^7$  atomen is gerealiseerd, hetgeen een factor 25 meer is dan in eerdere studies gehaald was. Dit grote aantal is een direct gevolg van de verbeterde startcondities voor verdampingskoeling, die we hebben kunnen realiseren door één-dimensionale Dopplerkoeling in de magneetval. Dezelfde Dopplerkoelingstechniek is ook succesvol toegepast om het spin-gepolariseerde fermionische isotoop ( $^3\text{He}^*$ ) te koelen, waarvoor thermaliserende botsingen sterk onderdrukt zijn. Detectietechnieken hier zijn afbeelden van absorptie, TOF metingen op een microchannel plate (MCP) detector, en ionendetectie (op een tweede MCP) om de groei en het verval van het condensaat te meten.

Doordat grote aantallen atomen in een condensaat konden worden geladen kon sympathetisch koelen van helium-3 (een fermion) door helium-4 (een boson), beide in de laagste triplet toestand, worden gerealiseerd met als resultaat mengsels die meer dan  $10^6$  atomen bevatten van elk isotoop bij een temperatuur onder  $1\ \mu\text{K}$ . Een fermionische ontaardingparameter  $T/T_F = 0.45$  kon worden bereikt. De resultaten van dit werk worden beschreven in Hoofdstuk 7. Als gevolg van hun hoge interne energie is detectie van individuele metastabiele atomen mogelijk met nanoseconde resolutie. Dit biedt de mogelijkheid bosonische en fermionische quantumgassen met grote precisie te bestuderen. Deze bron van quantum-ontaaarde fermionen, bosonen, en mengsels van de twee, kan de basis vormen van vele gevoelige experimenten op het gebied van de quantumoptica en quantumgassen.

Tot slot wordt in Hoofdstuk 8 een experimentele vergelijking gemaakt van het Hanbury Brown en Twiss effect voor  $^4\text{He}^*$  (boson) een  $^3\text{He}^*$  (fermion) atomen. Gewone aantrekkende of afstotende krachten zijn hier verwaarloosbaar en daarom kan het contrasterende gedrag dat voor beide isotopen is waargenomen, bunching voor de bosonen en antibunching voor de fermionen, volledig worden toegeschreven aan het verschil in quantumstatistiek van beide isotopen. Deze resultaten demonstreren hoe atoom-atoom correlatiemetingen gebruikt kunnen worden om details van de ruimtelijke dichtheidsverdeling of impulsrelaties tussen atomen in een koude wolk atomen te meten. Verder maken ze ook directe observatie van fase-effecten gerelateerd aan de quantumstatistiek van een veel-deeltjes systeem mogelijk, hetgeen perspectieven biedt voor studies van meer exotische situaties.